

ARTÍCULO TÉCNICO

Jeannette Amparo Forero¹,
Jenny Rocío Medina², María Cristina García³
y Hugo Reinel García⁴

ABSTRACT

Design and construction of a prototype storage system for pitahaya

The lack of postharvest alternatives to maintain pitahaya quality is partly responsible for the technological limitations to better position the fruit for international commercialization. Cold temperatures from harvest to the consumer are the best option for quality assurance but it is not economically attractive because of the high cost of refrigeration. A prototype storage system suited for the pitahaya producers was designed and tested. First, taking into account humidification and ventilation, the thermal load was established and a four phase system was proposed: natural ventilation at night, hermetic sealing during the morning, humidification and forced ventilation between 16 and 22 hours. With this system storage trials for green and ripe pitahaya were done evaluating external appearance and maturity and dehydration stages. Temperature, internal and external relative humidity every 15 minutes were registered for a period of 19 days. Storage chamber generated a temperature difference of 5°C when the external temperature was over 20°C. It also maintained a 16% difference in relative humidity throughout the day. Using this system, green pitahaya reached a self life of 19 days under optimal conditions for commercialization and consumption.

Key words: Pitahaya, storage, humidification, ventilation.

Radicado: enero 28 de 2008
Aceptado: junio 6 de 2008

1. Ing. Química, Analista HSEQ, Arysta Life Science Colombia S.A. e-mail: ingjeamfogue@hotmail.com
2. Ing. Química, Jefe de Control de Calidad, Lipesa Colombia S.A.
3. Investigador Master Asociado, Centro de Investigación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca), CORPOICA. e-mail: mkgarcia@corpoica.org.co
4. Investigador Master Principal, Centro de Investigación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca), CORPOICA. e-mail: hgarcia@corpoica.org.co

Diseño y construcción a nivel piloto de un sistema de almacenamiento para pitaya

RESUMEN

La comercialización de la pitaya encuentra limitantes tecnológicos que le impiden posicionarse en mercados internacionales, en parte por la ausencia de alternativas poscosecha que permitan mantener su calidad. El uso de bajas temperaturas desde la cosecha hasta la entrega al consumidor constituye la mejor opción para asegurar la calidad, pero desde el punto de vista económico no resulta llamativa por el alto costo de los sistemas de refrigeración mecánica. Para solucionar este problema se diseñó y probó un dispositivo piloto de almacenamiento ajustado a las condiciones de los productores de pitaya. Mediante análisis de escritorio se determinó el sistema de almacenamiento más adecuado, el tipo de empaque, los materiales y las técnicas de pre-enfriamiento a utilizar. Aplicando los principios de humidificación y ventilación se calculó la carga térmica y se determinó la forma de operación del sistema en cuatro etapas: ventilación natural en la noche, cierre hermético durante la mañana, humidificación y ventilación forzada entre las 16 y 22 horas. En el sistema se adelantaron ensayos de almacenamiento de pitaya verde y madura, evaluando la apariencia externa y los grados de madurez y deshidratación; así mismo, se determinaron la temperatura y la humedad relativa interna y externa cada 15 minutos a lo largo de 19 días. La cámara generó una diferencia de temperatura promedio de 5°C cuando la temperatura externa superaba los 20°C; además, mantuvo una diferencia promedio de 16% en la humedad relativa a lo largo del día. La pitaya verde almacenada en el sistema propuesto alcanzó un tiempo de vida útil de 19 días en condiciones óptimas para su comercialización y consumo.

Palabras clave: *Selinicereus megalanthus*, almacenamiento frutales, humidificación, ventilación.

INTRODUCCIÓN

LA PITAYA CULTIVADA EN COLOMBIA se caracteriza por tener una corteza de color amarillo con espinas, brácteas y una pulpa blanca con pequeñas semillas negras. Aunque es un producto con aceptación en el mercado internacional no cuenta con el respaldo tecnológico apropiado para el cultivo, la cosecha, la poscosecha y la comercialización, lo que ha limitado el crecimiento y participación de esta agrocadena en la oferta exportadora de productos frutícolas exóticos. Aunque los mercados de productos hortofrutícolas han mostrado un crecimiento fuerte en los últimos años, también se ha observado una oferta creciente y requisitos cada vez más exigentes en cuanto a calidad y cumplimiento de la normatividad y las regulaciones como las BPAs y las BPMs. El mantenimiento de la calidad del producto una vez recolectado hasta la entrega al consumidor final se ha convertido en el reto de las cadenas de productos perecederos, de las cuales la pitaya hace parte.

Si bien es conocido el efecto positivo de la reducción de la temperatura sobre la conservación de la calidad de los productos hortofrutícolas, el alto consumo de energía de los sistemas de refrigeración mecánica los excluye de las tecnologías apropiadas para productos de bajo valor agregado. Por lo tanto, lograr la reducción de la temperatura a través de tecnologías de bajo costo constituiría una verdadera solución al problema de perecibilidad de la pitaya, con reducción de las pérdidas poscosecha, el incremento de la vida útil y el aumento de la competitividad de esta agrocadena.

Temperaturas bajas y humedades relativas altas contribuyen a incrementar el tiempo de vida útil de los productos hortofrutícolas, y por esta razón, las cadenas de frío son alternativas ideales para el mantenimiento de la calidad de la fruta. No obstante, la cadena de frío debe implementarse desde las fincas productoras, mediante un enfriamiento rápido del producto y su almacenamiento tem-

poral a baja temperatura. En los cultivos de clima cálido y templado, como el caso de la pitaya, el cumplimiento de estas recomendaciones se hace difícil por la prevalencia de temperaturas altas y humedad relativa baja propias de estos sistemas de producción; allí los requerimientos de los sistemas de refrigeración se hacen mayores y se incrementan los costos, reduciendo competitividad.

En estudios previos se ha establecido que la pitaya almacenada a temperaturas entre 2 y 5°C generan maduración incompleta, entre 6 y 8°C disminuye la velocidad de maduración y no hay proliferación de patógenos y entre 10 y 15°C la maduración es completa y apta para el consumo, alcanzando las características organolépticas propias de la fruta madura. Con respecto a la humedad relativa se sabe que valores entre 85 y 90% resultan adecuadas para su conservación.

El presente estudio evalúa la efectividad de un sistema de almacenamiento de bajo costo con reducción de temperatura, accesible a la gran mayoría de los productores. Los parámetros tenidos en cuenta para su diseño incluyeron el cálculo de la *carga de refrigeración*⁴, además del análisis de alternativas para los diferentes elementos y materiales a utilizar en su construcción. El sistema se evaluó a través del seguimiento de la deshidratación, la apariencia externa y la evolución de color pitayas verdes y maduras almacenadas; finalmente, se comparó la temperatura y humedad relativa externa con la alcanzada por el sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en tres fases: en la primera se evaluaron, mediante documentación y análisis de ingeniería a nivel escritorio, diferentes alternativas para el pre-enfriamiento, el empaque y los sistemas de almacenamiento. En la segunda fase se diseñó y construyó el sistema de almacenamiento, y en la tercera se eva-

luó el comportamiento poscosecha y se ajustó el dispositivo.

Selección de sistemas de pre-enfriamiento

Se analizaron cuatro métodos de enfriamiento con agua, con hielo, con aire forzado y al vacío. Los parámetros de evaluación fueron la eficiencia del método, el costo de implementación y mantenimiento, los efectos sobre la fruta y la facilidad de implementación. En la Tabla 1 se presentan las características generales de cada uno de estos métodos; en la Tabla 2, la comparación cuantitativa entre estos métodos y en la Tabla 3, la escala de calificación utilizada en la tabla de comparación. A partir del análisis de esta información se seleccionó el sistema de enfriamiento con agua como método más adecuado para la pitaya.

Selección de empaques

Los empaques evaluados fueron: cajas plásticas, de madera y de cartón; bolsas de plástico y de papel; bolsas red, sacos y fibras. Los parámetros de evaluación utilizados fueron: costo, estabilidad de apilamiento, ventilación, impermeabilidad, resistencia mecánica, presentación del producto, comportamiento fisiológico del producto, disponibilidad, reutilización, ajuste a normas internacionales, facilidad de manipulación, transporte, biodegradabilidad, capacidad y relación capacidad/peso. El empaque con mayor puntuación fue la caja de cartón, seguida de la canastilla plástica; no obstante, este último fue el empaque seleccionado para las pruebas dado el volumen que se maneja en las mismas. En la Tabla 4 se encuentran las características de estos empaques; en la Tabla 5, la evaluación y calificación de estos empaques según los parámetros seleccionados y en la Tabla 6, la escala de calificación numérica usada.

Selección de sistemas de almacenamiento

Aquí se evaluaron 11 métodos: almacenamiento refrigerado, fosos o trincheras, humidificación, silos de madera, almacenamiento ventilado, arrume cubierto, sótanos, almacenamiento hipobárico, atmósferas controladas, atmósferas modificadas, e *in situ*). Como parámetros se asumieron el costo, la afinidad con el producto a almacenar, la facilidad de operación y mantenimiento, el consumo de energía, la disponibilidad, la eficacia en términos de vida útil de la fruta y la

facilidad de implementación. Los sistemas de almacenamiento escogidos fueron los de humidificación y ventilación. Los resultados de esta evaluación, así como la escala utilizada, se pueden observar en las Tablas 7 y 8, respectivamente.

Selección del material de aislamiento

También se evaluaron 11 materiales aislantes: corcho aglomerado, fibra de vidrio, fibras minerales, poliestireno expandido o icopor, styrofoam, foamglass o espuma de vidrio, cloruro de polivinilo o klegecell, espuma rígida de poliuretano, espumas fenólicas, perlita y cascarilla de arroz. Se tomaron como parámetros de evaluación la conductividad, el costo y la disponibilidad. Las características de estos aislantes, así como la comparación entre ellos y la escala de evaluación, se pueden observar en las Tablas 9, 10 y 11, respectivamente.

Cálculo de la capacidad, selección de opciones de diseño y construcción del sistema

La capacidad del sistema se estimó en términos de kg de pitaya almacenada como paso previo a determinar la carga térmica (o carga de refrigeración) correspondiente. Para el diseño del sistema de almacenamiento a nivel piloto se consideraron la capacidad de almacenamiento, el empaque, su disposición y estibado.

El análisis de ingeniería determinó una capacidad del dispositivo de 30 kg de pitaya amarilla, distribuidas en dos canastillas plásticas de 60 × 40 × 25 cm, con dos capas de fruta por canastilla. La altura del sistema se fijó de acuerdo con la altura de la carga, dejando entre 30 y 40 cm de distancia entre la carga y el techo. Con respecto a las paredes laterales, la fruta debería mantenerse mínimo a 5 cm de distancia, excepto de la pared donde se ubiquen los ventiladores, donde la distancia mínima debe ser de 10 cm. Finalmente, los pasillos deben tener las mismas dimensiones para evitar la canalización del aire y, por tanto, la reducción de la eficiencia del sistema de ventilación.

De acuerdo con las dimensiones de las canastillas, la altura de la estiba y las recomendaciones previas sobre la distribución de la fruta en el cuarto de almacenamiento, las dimensiones calculadas fueron: 1,20 m alto; 1,24 m largo y 1,00 m ancho.

4. Relación entre la ganancia y la pérdida de calor a través de las paredes, por eliminación y reemplazo del aire, por el calor de la respiración de la fruta y el que trae la fruta del campo, y por la ganancia de calor proveniente de ventiladores eléctricos, luces y mano de obra.

Tabla 1. Características de los diferentes sistemas de pre-enfriamiento evaluados.

Método	Diseño	Características	Ventajas	Desventajas
Hielo triturado	Contact-icing: consiste en mezclar hielo triturado directamente con el producto Top-icing: se coloca un recubrimiento de hielo de cobertura mediante una manguera, una vez que las cajas han sido cargadas en el vehículo.	Existen dos métodos: Contact-icing y Top-icing. Contact-icing se utiliza para hortalizas (lechuga) y zanahoria. El Top-icing se utiliza en transporte de aguacate y melón.	El enfriamiento de los productos es rápido. Se utiliza especialmente para transporte. Necesita pocos equipos.	Presenta inconvenientes por la evacuación del agua procedente de la fusión del hielo. Demasiada humidificación aumenta el riesgo de podredumbre. Poco utilizado en frutas. El hielo derretido deja el empaque parcialmente lleno. Puede dañar el empaque.
Enfriamiento con aire forzado	Consiste en exponer los productos a una corriente de aire frío. Se necesita un equipo (ventilador, serpentines, etc.) especial que proporcione un movimiento rápido del aire para el enfriamiento. Se puede aplicar con diferentes técnicas como túneles, cámaras, por chorros y por presión de aire.	Se enfrían por este sistema: tomates, ají, pepino, uvas, durazno, ciruelas y cerezas.	Se utiliza para enfriar frutas.	Pérdidas de peso que varían entre 0,5% y 1%. Puede producir deshidratación del producto; para reducir el daño se han diseñado métodos de humidificación complementarios. Requiere tiempos largos para enfriar el producto. Altos costos de energía.
Hidrogenfriamiento	El producto se sumerge en agua fría que circula constantemente a su alrededor usando un intercambiador para lograr una tasa de enfriamiento alta. También se puede conseguir agua a bajas temperaturas por adición de hielo. Hay diferentes sistemas: spray en túneles, inmersión en tanques y spray en cintas transportadoras; todos se aplican en la industria.	La transmisión de calor de un sólido a un líquido es más rápida que la transmisión de sólido a gas; así, el enfriamiento con agua puede ser rápido y mitigar las pérdidas de peso del producto durante la operación. Esta técnica depende de la relación superficie / volumen del producto y es adecuada para vegetales que soporten el exceso de agua. El tiempo de enfriamiento depende del tamaño del producto. Se usa ampliamente en hortalizas.	Ayuda a limpiar el producto; sin embargo, el agua puede contaminarse con microorganismos por lo que se añaden funguicidas o bactericidas (dióxido de cloro, hipoclorito de sodio) para controlar la suciedad del agua y el deterioro del producto. Es un método de enfriamiento rápido. Enfría tanto frutas como hortalizas (calabazas, espárragos, manzanas, peras, ciruelas, duraznos y ciruelas)	Puede favorecer la propagación de enfermedades contagiosas. Los requerimientos de energía son altos. El empaque debe ser resistente al agua.
Vacío	En este método el agua absorbe calor a medida que se evapora; la evaporación se acelera usando presión atmosférica baja. El proceso al vacío usualmente se logra con una bomba aspiradora. La humedad del producto se condensa en serpentines de enfriamiento situados entre la salida del pre-enfriador y la bomba.	Se logra gracias al calor latente de vaporización, la velocidad y efectividad del enfriamiento, lo que está determinado por la relación entre el área del producto y su volumen; así, es particularmente adecuado para hortalizas de hoja. Se utiliza especialmente para la lechuga, espinacas, repollo, coliflor, apio y espinacas.	El enfriamiento es homogéneo y rápido; si hay una baja relación entre el área y el volumen, el enfriamiento puede ser más lento.	Alto costo de instalación y mantenimiento. Los materiales deben ser resistentes para el proceso de vacío y, por tanto, los costos son altos.

Tabla 2. Tabla de comparación de métodos de pre-enfriamiento.

Sistemas	Operación y carga	Requisitos material de empaque	Peligros para el producto	Consumo de energía	Diseño	Pérdida de peso del producto	Total
Hielo triturado	3	1	1	1	3	3	12
Aire forzado	2	3	3	2	1	1	12
Hidrogenfriamiento	3	2	1	2	2	3	13
Vacío	1	3	2	1	1	2	10

Tabla 3. Escala utilizada en la comparación de los métodos de pre-enfriamiento.

Numeración	Operación y carga	Diseño	Material de empaque	Peligros para el producto	Consumo de energía	Pérdida de peso del producto
1	Complejo	Complejo	Alta calidad	Propagación de enfermedades	Alto	Moderado
2	Moderado	Moderado	Resistente al agua	Congelación del producto	Moderado	Mínimo
3	Simple	Simple	Casi todos	Ninguno	Bajo	Ninguno

Tabla 4. Características, ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de empaque evaluados.

Empaque	Características	Ventajas	Desventajas
Cajas de madera	Tipos: bruta, cepillada, contrachapada o aglomerada y voluminosa.	Buena resistencia mecánica Tolera sellos, marcas de fuego, pinturas y otros. Resisten el estibado. Tienen buena ventilación. Gran diversidad de diseños.	Alto peso. Destrucción de bosques nativos para su fabricación. Rusticidad (presencia de bordes cortantes que pueden ocasionar daños físicos al producto). Falta de uniformidad. No son fáciles de limpiar. En su superficie se desarrollan con facilidad microorganismos contaminantes. Alto costo. Sensibles al sol y a la humedad. La madera adsorbe agua hasta saturarse con lo que la humedad relativa adecuada difícilmente se alcanza. Se pudre fácilmente. El transporte es costoso. Se debe forrar el interior para proteger el contenido de astillas y clavos salientes.
Bolsas red	Poseen aberturas de 3 a 6 mm. Esta formada por hilos de polipropileno.	Buena ventilación para el intercambio de gases y calor. Excelente visibilidad del producto Fácil cierre con cordones o grapas metálicas. Bajo costo.	No protege el contenido contra daños mecánicos. No ofrece protección contra la humedad baja o alta.
Cajas de cartón	Tipos: pared simple y pared doble u ondulado (formado por tres capas). Dimensiones para el mercado nacional: 50 cm largo * 33 cm ancho * 30 cm alto. Dimensiones mercado exterior: 40 cm largo * 30 cm ancho * 12 cm alto. Desechable.	Resistentes e higiénicas. Reciclables y biodegradables. Excelente presentación del producto. Livianas. Se consiguen de diferentes diseños. Tienen suficiente ventilación. Sus dimensiones son uniformes y facilitan el arrume. Protegen el producto de daños mecánicos, químicos, fúngicos y bacterianos. Puede imprimirse fácilmente.	Sensibles a la humedad (aunque se puede plastificar o encerar para evitar daños). No es recomendable reutilizar las cajas de cartón, para empacar productos perecederos por problemas sanitarios. Son costosas. Vulnerable a la perforación. No se puede recuperar ya que se vende con el producto.
Sacos, tulas o costales	Diferentes capacidades (25, 38 y 50 kg). Se fabrican de diferentes materiales orgánicos como fique y yute.	Fácil de conseguir. Bajo costo. Liviana. Es altamente reutilizable para muchos fines.	No protege el producto contra daños mecánicos. Se dificulta el manejo cuando el bulto tiene exceso de peso. La fruta queda expuesta a la contaminación. Las unidades del producto empacadas en el centro del costal tienen poca aireación. Los productos sufren magulladuras. Es poco resistente comparado con otras fibras textiles. La humedad lo deteriora fácilmente.
Cajas plásticas	Se utilizan para recolección, transporte y comercialización. Duración en promedio de 6 años. Capacidad: 14 kg (600mm largo, 400 mm ancho, 250 mm alto), 12 kg (500mm largo, 300 mm ancho, 300mm alto). Hay modelos plegables. Están fabricadas de polivinilcloruro de alta densidad.	Bajo peso. Variados tamaños. Son recuperables. Garantizan la protección, conservación y calidad del producto. Resisten manejos bruscos. Amplia duración con respecto a otros empaques. Se acopla con facilidad a cualquier producto. Resistente a cambios de temperatura y humedad excesiva. Facilita arrumes altos. Tienen suficientes orificios para la ventilación. Son lavables y resistentes a detergentes, limpiadores y desinfectantes. Bastante variedad de diseños. Impermeable.	El intercambio con los comerciantes no es fácil. Exige una alta inversión en el momento de la compra. El regreso de canastas vacías representa un sobre costo en el transporte. Son inflamables. Difíciles de eliminar. Se deterioran por el sol, a menos que se trate con un inhibidor de rayos ultravioleta. En países desarrollados cobran impuesto ambiental por su difícil eliminación.
Sacos de papel	Compuesto hasta por 6 capas de Kraft (papel pesado de embalaje). Se cierra cosiendo a máquina en la parte superior.	Bajo costo. Reciclable. Fácil de adquirir. Livianos.	El papel es muy permeable al agua, vapor y gases; se puede colocar una capa de plástico o papel de estaño. Es difícil de mantener arrumes. No protege la fruta de daños mecánicos ni por compresión. Mala ventilación (puede generar putrefacción).
Bolsas plásticas	Se fabrican de polietileno, poliestireno y polivinilcloruro. Hay de diferentes tamaños y capacidades.	Livianas. Se consiguen fácilmente. Bajo costo. Higiénicas. Transparencia, ya que ofrece excelente visibilidad del producto.	No ofrece una adecuada protección al producto. Aunque son perforadas, pueden generar condensaciones sobre el producto. No tienen estabilidad para el apilamiento y cuando se apilan, el producto sufre deterioro por compresión. Propicia una rápida acumulación de calor si se expone al sol. No utilizar para transportar el producto (genera focos de calor y no es resistente).

Tabla 5. Comparación de los atributos de diferentes tipos de empaque para frutas.

Empaque Parámetro	Cajas de madera	Bolsas red	Cajas de cartón	Sacos, tulas o costal	Canastas plásticas	Sacos de papel	Bolsas plásticas
Costo	2	3	2	3	1	3	2
Biodegradabilidad	5	1	5	5	1	5	1
Ventilación	3	4	5	3	5	1	2
Resistencia mecánica	5	3	4	4	5	4	2
Presentación del producto	1	4	5	2	5	2	3
Conservación de la fisiología del producto	3	2	5	1	5	1	2
Disponibilidad	4	3	4	3	5	2	5
Impermeabilidad a la contaminación	2	1	3	1	2	1	4
Embalaje de acuerdo con el mercado							
Nacional	2	1	2	1	3	1	2
Internacional	1	1	3	1	1	1	1
Reutilización con el mismo producto	2	3	1	2	3	1	2
Transporte del empaque	1	3	3	3	1	3	3
Total	32	30	47	30	42	26	30

Tabla 6. Escala de calificación de los empaques.

Numeración	Costo		Estabilidad de apilamiento	Biodegradabilidad	Ventilación	Resistencia mecánica	Presentación del producto	Conservación fisiología del producto	Disponibilidad	Impermeabilidad a la contaminación	Mercado	Reutilización	Transporte del empaque
	Característica	Valor unitario (aprox. igual capacidad)											
1	Alto	>6.000	Mala	No	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	No	No	Complejo
2	Medio	3.000 - 5.000	-	-	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala	Poco	Poco	-
3	Bajo	500 - 2.000	-	-	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Mucho	Mucho	Fácil
4	-	-	-	-	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	-	-	-
5	-	-	Buena	Si	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	-	-	-

Tabla 7. Comparación de diferentes métodos de almacenamiento.

Sistemas / Parámetros	Costo	Diseño	Producto	Mantenimiento y operación	Consumo energía	Disponibilidad	Tiempo de almacenaje	Daños físicos	Total
Ventilación	2	2	4	3	2	3	2	3	21
Refrigeración	1	1	4	2	1	3	3	3	18
Trincheras	2	3	4	1	3	3	1	1	18
Arrumes	3	3	3	3	3	2	1	1	19
Sótanos	1	3	4	3	3	2	1	2	19
Hipobárico	1	1	3	1	1	1	3	3	14
Humidificación	2	2	5	2	2	3	2	3	21
Atmósfera controlada	2	2	4	3	3	2	1	1	18
Atmósfera modifica	1	1	5	1	1	1	3	3	16
<i>In situ</i>	1	1	5	1	1	1	3	3	16
Silos	3	3	2	3	3	3	1	1	19

Tabla 8. Escala de calificación utilizada para calificar los sistemas de almacenamiento.

Puntaje	Costo		Diseño	Productos	Operación y mantenimiento	Energía	Disponibilidad	Tiempo de almacenamiento	Daños físicos
	Características	Costo unitario (\$)							
1	Alto	> 6.000.000	Complejo	Frutas no climáticas	Mucho	Mucho	Baja	Corto	Mucho
2	Medio	2.000.000 - 5.000.000	Moderado	Sin frutas	Poco	Poco	Media	Mediano	Moderado
3	Bajo	100.000 - 1.000.000	Simple	Casi todas	Bajo	Bajo	Alta	Largo	Poco
4	-	-	-	Todos	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 9. Características de diferentes aislantes evaluados para desarrollar un sistema de refrigeración.

Tipo de aislante	Características	Dimensión comercial	Conductividad (W/m °K)
Corcho aglomerado	Buena resistencia mecánica a la compresión. Adecuado para suelos de cámara a cualquier temperatura.	1 x 0,5 m	0,045
Fibra de vidrio	Panel semirígido $\delta = 22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Espesor: 120 mm Panel rígido a baja temperatura $\delta = 37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1,20 x 0,6 m Espesor: 40 - 80 mm	0,046 - 0,035
Fibras minerales	Composición: Si 42%, Na 40%, Al 12%, Mg 3,6%, óxidos metálicos 1,6%	1 x 0,5 m ² Espesor: 30 - 100 mm	0,071 - 0,123 Con aglomerante de arcilla
Poliestireno expandido o icopor	Bajo costo. Aislante sintético. No es adecuado para aislamiento del suelo por su baja resistencia mecánica.	1,2 x 0,6 m	0,023 - 0,035
Stirofoan	Bajo coeficiente de conductividad. Buena resistencia mecánica (Para aislamiento de suelos cargados). Baja permeabilidad al calor. Utilizado para la construcción de sándwich de aislamiento.	0,5 x 0,1 m 0,5 x 2 m Espesor: 40 - 120 mm	0,033
Espumas fenólicas	Buena resistencia mecánica. Excelente coeficiente de conductividad.	Rollos	0,025
Vidrio celular (foamglass) o espuma de vidrio	Buena resistencia mecánica. Sirve para paredes por la flexión. Permeabilidad prácticamente nula. Foamglass T2 (125 kg·m ⁻³) Foamglass S3 (135 kg·m ⁻³)	Rollos	0,046 - 0,079
Cloruro de polivinilo o klegecell	Utilizado en camiones frigoríficos. Buena resistencia a la compresión. Empleado en la construcción de cámaras frías con grandes paneles sándwich.	Presentación comercial en estado líquido	0,09
Espuma rígida de poliuretano	Posee una conductividad térmica débil con respecto a los demás aislantes utilizados en la actualidad. Buena resistencia mecánica. Cuando la carga térmica es elevada se ha de ir a una densidad más alta.	Presentación comercial en estado líquido	0,018 - 0,03
Perlita	El único aislante granulado. Su empleo se limita al aislamiento de envases fijos o móviles a bajas temperaturas.	Granulado (peso)	0,036 - 0,056
Cascarilla de arroz	Material de desecho en la industria arrocera, con problemas de contaminación ambiental. Posee una capacidad aislante muy buena. La conductividad térmica es comparable con la del corcho granulado y la lana mineral. Materia prima en construcciones para mantener una temperatura promedio. La cascarilla de arroz no se inflama fácilmente y su combustión es lenta. A temperaturas altas (1.700°C) se debe mezclar con ceniza.	Cascarilla suelta a granel Cascarilla empacada por vibración Cascarilla compactada manual	0,03605

Fuente: Kreith, 1993; Mills, 1995; Instituto del Frío, 1997.

Tabla 10. Comparación de diferentes tipos de materiales aislantes.

Tipo de aislante	Conductividad	Costo	Disponibilidad	Utilización para cámaras frías	Total
Corcho aglomerado	2	1	2	2	7
Fibra de vidrio	2	1	3	1	7
Fibras minerales	1	1	2	1	5
Poliestireno expandido	3	3	3	2	11
Styrofoam	3	1	1	3	8
Vidrio celular	1	1	1	1	4
Cloruro de polivinilo	1	1	2	3	7
Poliuretano	3	1	3	3	10
Espumas fenólicas	3	1	1	2	7
Perlita	2	1	2	3	8
Cascarilla de arroz	3	5	3	2	13

Tabla 11. Escala de calificación utilizada para evaluar los materiales aislantes.

Puntaje	Conductividad		Costo		Disponibilidad	Utilización en cámaras frías
	Característica	Parámetro (W/m °C)	Característica	Costo unitario (\$)		
1	Alta	> 0,05	Alto	> 5.000	Baja	Si
2	Media	0,035-0,05	-	-	Media	A veces
3	Baja	0,01-0,03	Medio	2.000 - 5.000	Alta	No
5	-	-	Bajo	100 - 1.000	-	-

Los materiales del dispositivo se seleccionaron de acuerdo con su costo, disponibilidad, facilidad de instalación, transporte y limpieza, resistencia a la corrosión y al vapor de agua, y vida útil. Los materiales seleccionados fueron: lámina galvanizada como estructura, aislante de cascarilla de arroz, poliestireno expandido (icopor), como sustituto del ladrillo y como barrera al vapor de agua, *Coll roll*. En la Tabla 12 se presentan algunas características

de estos materiales. Los cálculos de la carga de refrigeración se presentan a continuación.

Cálculo de la carga térmica

Se debe determinar la carga térmica del sistema de almacenamiento a nivel piloto, la cual se encuentra determinada por la cantidad de calor que se debe extraer del sistema de almacenamiento; éste resulta de las ganancias de calor por conducción, convección, radiación,

respiración del producto, etc. Así, se realizaron cálculos térmicos independientes para los parámetros siguientes: espesor del material aislante, carga transferida a través de la estructura (Q1), carga por infiltraciones de aire (Q2), la energía proveniente de la fruta (Q3), el calor de respiración de la pitaya (Q4), el calor generado por las personas (Q5 y Q6), el calor generado por el alumbrado (Q7) y, finalmente, el Factor de Calor Sensible (FCS).

Tabla 12. Características de los materiales de construcción del sistema de almacenamiento.

Función	Material	Espesor	Costo	Características
Estructura	Lámina galvanizada	Calibre 24 (0,0006 m)	Bajo	Resistente a la oxidación, no necesita pintura ni barrera de vapor y es de fácil mantenimiento.
Aislante	Cascarilla de arroz	0,1 m	Bajo	Bajo coeficiente de conductividad y es la alternativa óptima como se muestra en la Cuadro 14. Se considera un producto ecológico, ya que disminuye la contaminación que se genera en la industria arroceras debido a los grandes volúmenes que se producen.
Sustituto de ladrillos	Poliestireno expandido	0,015 m	Relativamente bajo	Su densidad es de 25 g•cm ⁻³ y es liviano.
Barrera de vapor	<i>Coll-roll</i>	Calibre 22 (0,00075 m)	Relativamente bajo	Se puede pintar, lo que representa una ventaja para reducir el calor por radiación y obtener una buena presentación.

- Espesor económico del aislante:

El espesor económico del material aislante esta dado por la ecuación (1).

$$e = ka * \Delta T / q \quad (1)$$

donde,

ka : coeficiente de conductividad del aislante, W/m °C (0,0309 W/m °C cascarilla de arroz)

q : valor constante = 8 W/m² (Pita, 1994)

ΔT : $T_e - T_i$

T_e : temperatura máxima exterior (36,6°C para Barbosa)

T_i : temperatura mínima interior (12°C para Barbosa).

Por lo tanto, a partir de la ecuación (1), $e = 0,095$ m, espesor que se aproximó a 10 cm.

- Carga total (Q1) transferida a través de las estructuras:

Es la ganancia de calor debido al efecto solar a través de paredes, suelo y techo. Para determinarla es necesario calcular el coeficiente global de transmisión de calor (U), el cual va a depender del espesor del material aislante, de los materiales de construcción y del movimiento del aire en el exterior e interior del sistema. La cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo a través de las paredes del sistema de almacenamiento es función de tres factores (Dossat, 1980):

$$Q = A * U * \Delta T \quad (2)$$

donde,

Q : cantidad de calor transferido, W

A : área de la superficie de la pared, m²

U : coeficiente de transferencia de calor, W/m² °K

ΔT : diferencia de temperatura entre el exterior e interior del sistema de almacenamiento, °K

$$\Delta T = tme - tmi \quad (3)$$

donde,

tme : temperatura media exterior del recinto, °C

tmi : temperatura media interior del recinto, °C

La temperatura media externa se calcula a partir de los datos del día típico de la región, según la expresión:

$$tme = 0,4 * tmn + 0,6 * tmáx \quad (4)$$

donde,

tmn : valor medio de las temperaturas medias mensuales correspondientes al período de trabajo del sistema de almacenamiento.

tmáx : valor medio de las temperaturas máximas en los meses correspondientes al período de trabajo del sistema de almacenamiento.

De acuerdo con el día típico de Barbosa, la tmn es 22°C y la tmax es 33,6°C.

De la ecuación (4) se obtiene que $tme = 28,96^\circ\text{C}$ y, por lo tanto, de la ecuación (3), que

$$\Delta T = 13,96^\circ\text{C}.$$

El coeficiente global de transferencia de calor (U) está dado por la siguiente ecuación:

$$U = (1/h_{ext} + x_1/K_1 + x_2/K_2 + x_3/K_3 + x_4/K_4 + 1/h_{int})^{-1} \quad (5)$$

donde,

U : coeficiente global de transmisión de calor, W/m² °C

h_{ext} : coeficiente de convección en el exterior, W/m² °C

h_{int} : coeficiente de convección en el interior, W/m² °C

K : coeficiente de conductividad térmica, W/m °C

x : espesor, m

En la Tabla 13 se presentan el espesor y la conductividad térmica de los materiales de construcción seleccionados.

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección internos (h_{int}) y externos (h_{ext}) se tomaron las ecuaciones existentes para paredes lisas; estas son (Vargas-Oviedo, sin año):

$$h_{int} = 6,8 + 0,85 * V \quad (\text{Kcal} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (6)$$

donde,

V : velocidad del viento = 1,2 km/h

Por lo tanto, a partir de (6) se tiene que

$$h_{int} = 7,82 \text{ Kcal} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ es decir,}$$

$$h_{int} = 9,09 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el coeficiente de convección externo se sabe que:

$$h_{ext} = 6,8 + 0,85 * V \quad (7)$$

donde,

V: velocidad del viento = 2,4 km/h

Por lo tanto, a partir de (7) se obtiene

$$\text{que } h_{ext} = 8,84 \text{ Kcal} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ es decir,}$$

$$h_{ext} = 10,28 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces, retomando (5), el coeficiente global de transmisión de calor sería:

$$U = (1/10,28 + 0,00075/43 + 0,015 / 0,035 + 0,1/0,0309 + 0,0006/43 + 1/9,09)^{-1}$$

$$U = 0,258 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como las paredes de la cámara reciben calor por radiación solar, la temperatura de las paredes tiende a ser mayor que la temperatura ambiente. El incremento de temperatura (IT) está determinado por las características del material y por la orientación espacial, como se aprecia en la Tabla 14. De aquí se tiene:

Para la pared sur-norte:

$$Q_{1,1} = A * U * (\Delta T + IT) \quad (8)$$

donde,

IT : incremento de temperatura por radiación solar, °C

A : área de la superficie de la pared, m²

Tabla 13. Conductividad térmica y espesor de los materiales del sistema de almacenamiento.

No.	Material	X (espesor) m	K (conductividad térmica) W/m °C
1	Coll roll (calibre 22)	0,00075	43
2	Poliestireno expandido	0,015	0,035
3	Cascarilla de arroz suelta	0,1	0,0309
4	Acero galvanizado (calibre 24)	0,0006	43

Fuente: Hollman, 1998; Red Latinoamericana de Cascarilla.

Tabla 14. Incremento de temperatura debido al efecto solar (°C).

Color de la superficie	Incremento de temperatura			
	Pared este	Paredes sur y norte	Pared oeste	Techo plano
Oscuro	4,4	2,8	4,4	11,1
Semioscuro	3,3	2,2	3,3	8,3
Claro	2,2	1,1	2,2	5,0

Fuente: Vargas-Oviedo, W. (Sin año).

Así,

$$Q_{1.1} = 2,4 * 0,258 * (13,96 + 1,1) = 9,325 \text{ W}$$

Para la pared este-oeste:

$$Q_{1.2} = A * U * (\Delta T + IT) \quad (9)$$

Así,

$$Q_{1.2} = 2,976 * 0,258 * (13,96 + 2,2) = 12,407 \text{ W}$$

Para la ganancia de calor debido al techo:

$$Q_{1.3} = A * U * (\Delta T + IT) \quad (10)$$

Así,

$$Q_{1.3} = 1,24 * 0,258 * (13,96 + 5) = 6,065 \text{ W}$$

La ganancia de calor debido al suelo no se consideró significativa.

Por tanto, el calor total transferido a través de las estructuras (Q1) sería:

$$Q1 = Q_{1.1} + Q_{1.2} + Q_{1.3} \quad (11)$$

Así,

$$Q1 = 9,325 + 12,407 + 6,065 = 27,797 \text{ W}$$

• Carga por infiltraciones de aire, Q2:

Es el calor suministrado por la apertura de puertas y filtraciones de aire.

$$Q2 = V * \delta a * N (h_{ext} - h_{int}) \quad (12)$$

donde,

V : volumen interno de la cámara, m³ δa : densidad del aire, kg/m³

N : cambios de aire por día

 h_{ext} : entalpía del exterior, kJ/kg aire seco h_{int} : entalpía del interior de la cámara, kJ/kg aire secoVolumen interno del sistema de almacenamiento, V = 1 m * 0,8 m * 1 m = 0,8 m³ δa : densidad del aire (a T = 28,96°C y P = 0,83 bar, en Barbosa) = 0,947 kg/m³N : cambios de aire por día; de la Figura 1 se obtiene que N = 1,504 × 10⁻³ renovaciones/s.

La entalpía se calculó a partir de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa, por medio del programa PSICROMÉTRICA VETHR, a la altura de Barbosa, 1.580 m.s.n.m.:

T_{int} = 15°CT_{ext} = 28,96°CHR_{int} = 85%HR_{ext} = 59,26% h_{int} = 42,815 kJ/kg aire seco h_{ext} = 75,409 kJ/kg aire seco

Por lo tanto, la carga por infiltraciones de aire (Q2) será:

$$Q2 = 0,8 * 0,947 * 1,504 \times 10^{-3} * (75,409 - 42,815) * 1000 \quad (13)$$

Así, Q2 = 37,13 W

• Energía proveniente de la fruta, Q3:

La fruta entrega al sistema energía proveniente del proceso normal de respiración, además del calor sensible que proviene del campo. Este último debe ser eliminado antes de llevar la fruta a almacenamiento y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q3 = Wp * Cp * \Delta T \quad (14)$$

donde,

Wp : masa del producto

Cp : calor específico, kcal/kg °C

 ΔT : diferencia de temperaturas entre el exterior e interior de la cámara, °C

El calor específico depende en esencia de una variable que es el porcentaje de agua o humedad del producto hortofrutícola. Se calcula mediante la fórmula de Seibel:

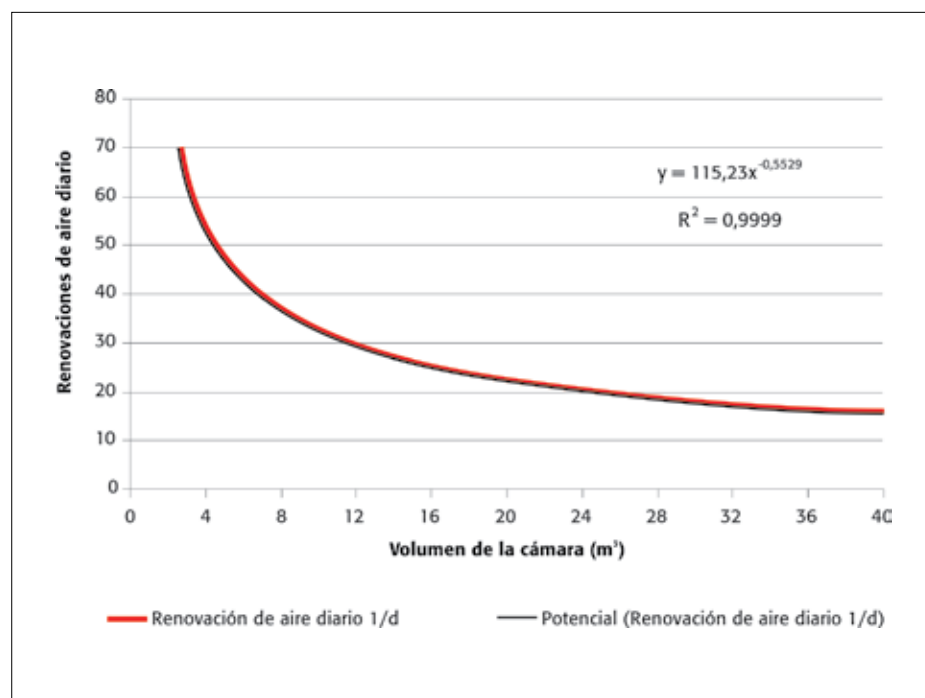
$$Cp = 0,008 * a + 0,20 \quad (15)$$

donde,

a : porcentaje de agua en el producto

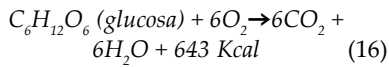
(a = 89,4 gr H₂O/100g de fruta)

Cp = 0,9152 Btu/lb °F ó 3830 J/kg °C

Sí, Q3 = 3,47 × 10⁻⁴ * 3830 * 13,96 = 18,552 W.**Figura 1.** Renovación de aire por día de acuerdo con el volumen de la cámara.

- Calor de respiración de la pitahaya, Q4:

Es el calor obtenido de la descomposición de la glucosa en CO₂ y H₂O, de acuerdo con la reacción:



Este calor de respiración es parte de la energía liberada (la otra parte de esta energía la utilizan las células para consumirla en sus actividades energéticas internas) y es el que precisa ser eliminado para mantener el fruto a baja temperatura durante el almacenamiento. De acuerdo con la estequiometría de la reacción y con la intensidad respiratoria de la pitaya (80 mg CO₂/ kg h), el calor de respiración es de 0,195 kcal / kg *h ó 0,226W / kg. Por lo tanto, de aquí se tiene que:

$$Q4 = 30 * 0,226 \quad (17)$$

Así, Q4 = 6, 78 W.

- Calor generado por personas:

En el sistema de almacenamiento de pitaya no habrá una ocupación prolongada de personal ya que el diseño es a nivel piloto. Se calcula de la siguiente forma:

$$Q5 = Q_s * N * I \quad (18)$$

$$Q6 = Q_L * N * I \quad (19)$$

donde,

Qs : calor sensible generado por persona, W

Q_L : calor latente generado por persona, W

N : número de personas

I : horas de ocupación/24h

En la Tabla 15 se presentan los valores típicos del calor proveniente de las personas.

Por tanto, Q5= 116 * 2/24 * 1 = 9, 66 W y Q6 = 256 * 2/24 * 1 = 21, 33 W.

- Calor generado por el alumbrado, Q7:

El calor generado por alumbrado depende del bombillo que se utilice; como el sistema de almacenamiento de pitaya no tiene bombillos en el interior, no hay generación de calor por alumbrado (Q7 = 0).

- Calor generado por el extractor, Q8:

En el sistema de almacenamiento a nivel piloto para pitahaya el motor del extractor está en la parte exterior y, por lo tanto, no se incluye dentro de la carga térmica (Q8 = 0).

- Carga térmica total:

La carga térmica total del sistema de refrigeración piloto para pitaya está dada por la sumatoria de estas fuentes según se muestra en la Tabla 16. Esto es 121,249 W, que utilizando un factor de seguridad del 10%, se obtiene 133,4 W.

Implementación del sistema de enfriamiento

Con esta información se diseñó el sistema de enfriamiento, para lo cual se partió de datos históricos de temperatura y humedad relativa del día típico de Barbosa (Santander, Colombia), lugar de ubicación del sistema piloto. Según esta información, el sistema de humidificación debe operar entre las 12 y las 16 horas por las altas temperaturas y baja humedad relativa que ocurren en este intervalo de tiempo. La temperatura y la humedad relativa en la noche varían notablemente con las del día; por lo tanto, para determinar la temperatura

mínima a la que se puede llegar en el día se utilizó el sistema de humidificación, y para la noche, cuando las temperaturas son bajas entre 14°C y 18°C, se parte del factor de calor sensible (FCS).

El FCS es una relación entre el calor o carga sensible y la carga total del sistema de almacenamiento y se aplica para ver la evolución o inercia del sistema. Para esto se determina la evolución desde una condición A hasta una condición B; con esta información se estima la necesidad de poner en funcionamiento el sistema de humidificación y ventilación.

$$FCS = Q_s / (Q_s + Q_L) \quad (20)$$

donde,

Q_L: carga latente, W

Q_s: carga sensible, W

$$\text{Así, } FCS = 93,14 / (93,14 + 28,11) = 0,76$$

Sobre la carta psicrométrica para determinar el factor de calor sensible (FSC) se ubicó el valor FCS = 0,76 y se unió con el punto focal, 24°C y 50%, para obtener una recta. Inicialmente se realizaron los cálculos para las condiciones de trabajo de la noche. Con la temperatura y humedad relativa típicas de Barbosa en la noche (18,3°C, 88,3% HR), se estableció

Tabla 15. Ganancias de calor generadas por persona.

Actividad	Calor total Kcal/h	Calor sensible Kcal/h	Calor latente Kcal/h
Sentado	90	55	35
Trabajo ligero	320	100	220
Trabajo pesado	400	140	260

Fuente: Carrier Air Conditioning Company (1983).

Tabla 16. Carga térmica del sistema de refrigeración piloto para pitaya.

Ganancias de calor	Sensible W	Latente W
Carga por infiltraciones de aire	37,130	
Calor de enfriamiento del producto	18,552	
Calor por respiración del producto		6,780
Calor sensible por personas	9,660	
Calor latente por personas		21,330
Carga térmica	93,14	28,11
Carga térmica total	121,25	
Factor de seguridad	1,1	
Carga térmica	133,4	

la temperatura mínima que podría alcanzarse con el funcionamiento del sistema. Esto condujo a $T = 18^{\circ}\text{C}$ con una HR = 90%. Por lo tanto, a estas condiciones de T y HR de la noche no se justifica el uso del sistema de humidificación y ventilación. De manera similar se procedió en cuanto la operación durante el día, y se determinó que la T y HR medias son de $33,61^{\circ}\text{C}$ y 24,83%, respectivamente; considerando que se puede alcanzar una HR mínima del 70%, se llega a que la temperatura mínima que podría alcanzarse es de $21,4^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, es necesario que el sistema de humidificación asegure contenidos de agua de 0,0055 kg/kg aire seco. La forma de operación del sistema se resume en la Tabla 17 en la que se observan cuatro etapas de operación a lo largo del día.

Para finalizar esta fase se calcularon la bomba y el extractor. Dadas las bajas necesidades de flujo volumétrico y de agua requeridas por el sistema no se encontró un extractor comercial de las características requeridas ($45 \text{ m}^3/\text{h}$); entonces, se recurrió a un extractor con un diámetro de 250 mm, un caudal máximo de aire de $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$, una potencia de 0,05 KW de marca Siemens, acoplado con una bomba sumergible (Little Giant Pump Company) con un caudal de 80 L/min, una columna de descarga de 1,8 m y una potencia de 35 W. El esquema del sistema de almacenamiento puede observarse en la Figura 2.

Evaluación del sistema

Una vez seleccionados cada uno de los elementos que conforman el prototipo de almacenamiento se dio inicio a los ensayos poscosecha con fruta a fin de conocer su efectividad. Las pruebas se desarrollaron en Barbosa (Santander, Colombia) en la Estación Experimental CIMPA de CORPOICA, mediante el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa en el sistema, así como la evaluación de la apariencia externa, el porcentaje de deshidratación, el grado de madurez y la vida útil de la pitaya almacenada. En la Figura 3 se presenta el diagrama de operaciones para la evaluación del sistema de almacenamiento de la pitaya.

El montaje de la prueba comenzó con la selección de los frutos eliminando aquellos que presentaban algún tipo de daño. Antes de la prueba de refrigeración

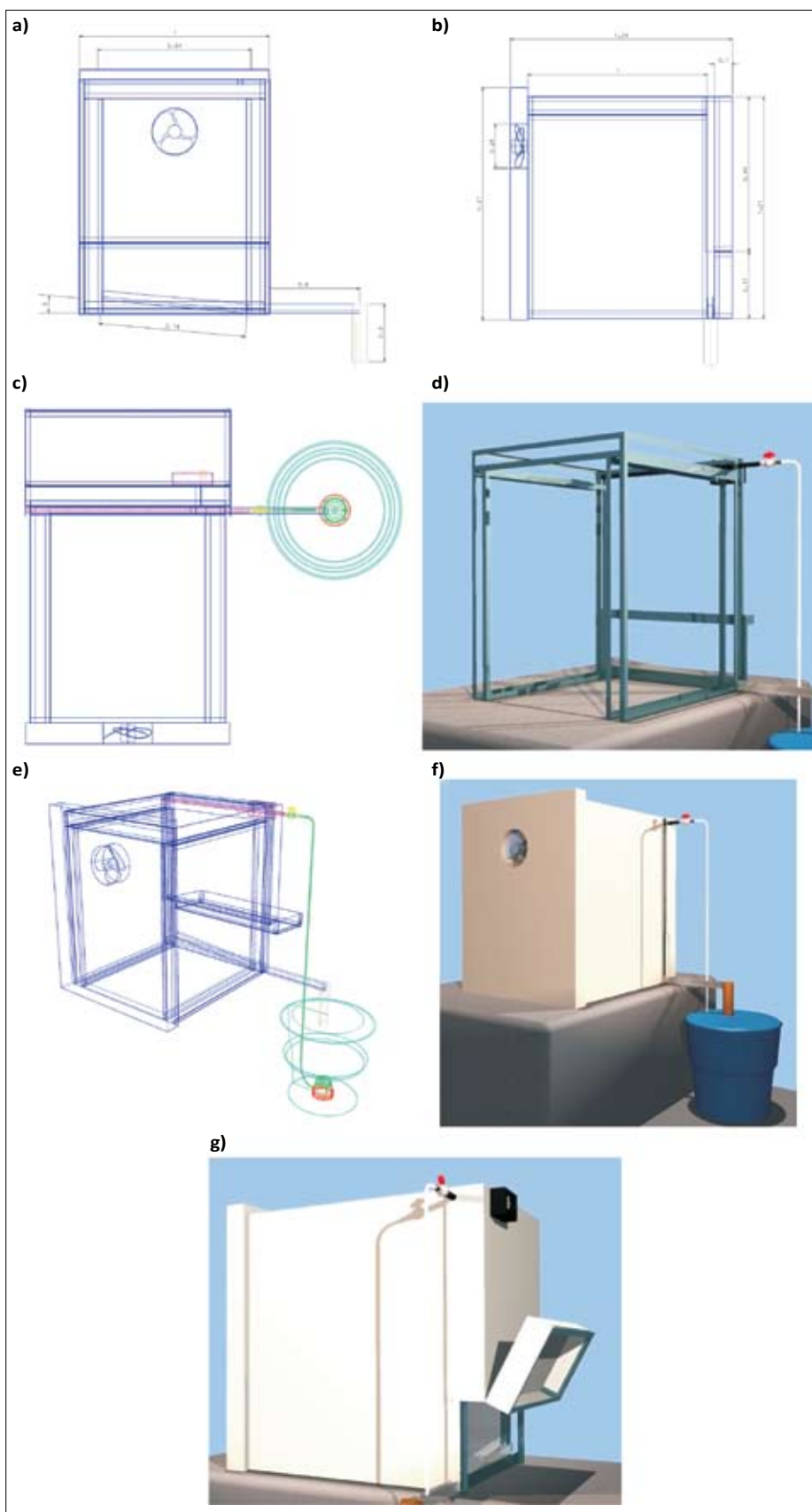
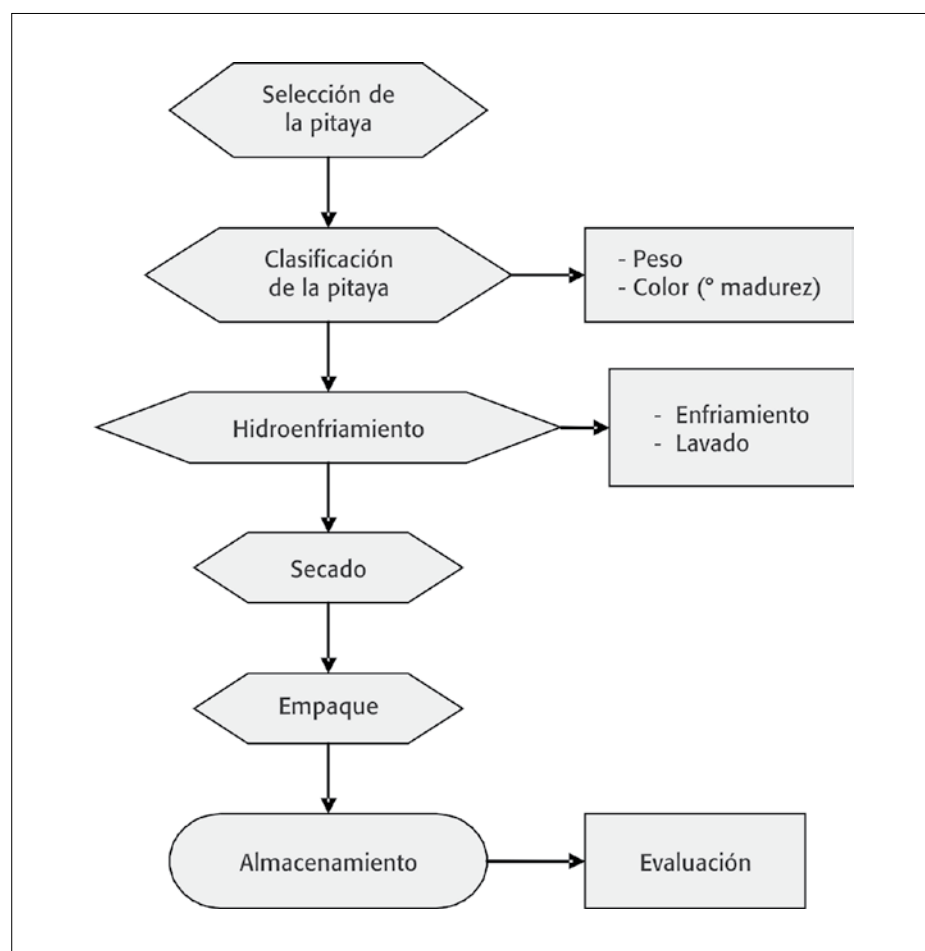
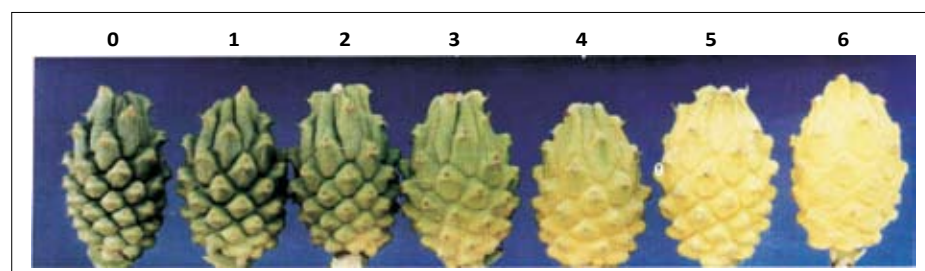


Figura 2. Sistema piloto de almacenamiento de pitaya: a) vista frontal, b) vista lateral, c) vista superior, d) vista tridimensional de la estructura de las cámaras, e) vista isométrica, f) vista tridimensional laterofrontal y g) vista tridimensional lateroposterior.

Tabla 17. Condiciones de operación del sistema de refrigeración piloto para pitaya.

Etapa	Nombre	Hora	Acción
I	Ventilación nocturna	22 h – 6 h	Ventilador fuera de funcionamiento. Apertura de puertas.
II	Hermeticidad	6 h – 12 h	Cierre hermético del sistema de almacenamiento.
III	Humidificación	12 h – 16 h	Funcionamiento del sistema de humidificación.
IV	Ventilación forzada	16 h – 22 h	Ventilación en funcionamiento, sin sistema de humidificación.

**Figura 3.** Diagrama de operaciones para los ensayos de almacenamiento.**Figura 4.** Tabla de color de la pitaya amarilla. Tomada de: NTC 3554 (Icontec, 1996).

los frutos remanentes se clasificaron de acuerdo con el grado de madurez propuesto por la tabla de color de la Norma Técnica Colombiana NTC 3554 (Icontec, 1996) (Figura 4). El pre-enfriamiento y el lavado de la fruta se hizo con agua a 20°C. Antes de su ingreso a la cámara, la fruta fue secada al ambiente y dispuesta en dos canastillas con 15 kg de fruta cada una distribuidas en dos capas para evitar el daño por compresión.

La eficiencia del sistema de almacenamiento diseñado se evaluó en términos de la calidad de la fruta y las condiciones de temperatura y humedad relativa alcanzadas dentro del sistema. El efecto del grado de madurez de la fruta también fue tomado como variable de entrada; en la Tabla 18, se presentan las características iniciales de la fruta. Los factores de evaluación y seguimiento de calidad de la fruta durante el almacenamiento fueron la evolución del grado de madurez (tomando como referencia la carta de color de la NTC 3554 de Icontec), el porcentaje de deshidratación (respecto del peso de fruta usando una Balanza Sauter de 1200 g) y, por último, la apariencia externa del fruto. Para este último caso se construyó la Tabla 19 en la cual se presenta la escala de calificación.

Las condiciones de temperatura y humedad relativa internas y externas fueron registradas cada 15 minutos a lo largo del tiempo de desarrollo de la prueba, mediante un registrador COX-Recorder®; el tiempo de evaluación fue de 19 días.

RESULTADOS

Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa

En la Figura 5 se presentan las diferencias de temperatura alcanzadas con el prototipo, mientras que en la Figura 6 se muestra el comportamiento de la humedad relativa (HR) en los ambientes exterior e interior de la cámara. La máxima diferencia de temperatura alcanzada fue de 7,5°C, la cual se registró alrededor del medio día cuando la temperatura externa fue máxima (36°C).

En la etapa I o de ventilación nocturna se aprovecharon la temperatura baja y la humedad relativa alta propias de

Tabla 18. Características de la pitaya almacenada en el tiempo cero.

	Numeración	Grado de madurez	Características	Presentación
Pitaya verde almacenada, V	1V1	2	ND, NA, NP	E
	2V1	1	ND, NA, NP	E
	3V1	2	ND, NA, NP	E
	4V1	2	ND, NA, NP	E
	5V1	1	ND, NA, NP	E
	1V2	2	ND, NA, NP	E
	2V2	2	ND, NA, NP	E
	3V2	2	ND, NA, NP	E
	4V2	2	ND, NA, NP	E
	5V2	1	ND, NA, NP	E
Pitaya testigo, T	1T	2	ND, NA, NP	E
	2T	1	ND, NA, NP	E
	3T	2	ND, NA, NP	E
	4T	1	ND, NA, NP	E
	5T	0	ND, NA, NP	E
	6T	0	ND, NA, NP	E
	7T	2	ND, NA, NP	E
	8T	2	ND, NA, NP	E
	9T	2	ND, NA, NP	E
	10T	1	ND, NA, NP	E
Pitaya madura almacenada, M	1M1	5	ND, NA, NP	E
	2M1	4	ND, NA, NP	E
	3M1	4	ND, NA, NP	E
	4M1	5	ND, NA, NP	E
	5M1	4	ND, NA, NP	E
	1M2	5	ND, NA, NP	E
	2M2	4	ND, NA, NP	E
	3M2	4	ND, NA, NP	E
	4M2	5	ND, NA, NP	E
	5M2	4	ND, NA, NP	E

Interpretación: el número posterior a la letra de identificación del estado de madurez de la pitaya corresponde al número de la canastilla donde fue ubicada la fruta: "1" corresponde a la canastilla ubicada en la parte inferior y "2" a la canastilla ubicada en la parte superior. Así 3M2 significa: pitaya #3 en estado inicial maduro "M" ubicada en la canastilla superior.

Tabla 19. Escala de evaluación para la apariencia externa de la pitaya.

Parámetros		Descripción	Símbolo	Puntaje
Epidermis	Daño	Ningún defecto: 0%	ND	5
		Leve: pequeñas manchas y rayas, máx 25% del área	LD	4
		Moderado golpes, moho y cortaduras, máx 50% del área	MD	3
		Severo cortaduras y deformaciones, 80% o más del área	SD	2
	Arrugamiento	Negativo, epidermis totalmente lisa	NA	5
		Ligero, 30%	LA	4
		Moderado, 60%	MA	3
		Severo, 90%	SA	2
	Patógenos	No hay, 0%	NP	5
		Leves, 5%	LP	4
		Moderados, 15%	MP	3
		Severos, 25%	SP	2
Presentación	Excelente	E		
	Bueno	B		
	Regular	R		
	Malo	M		

esas horas; en efecto, al abrir el sistema y permitir el equilibrio entre la cámara y el ambiente externo, se lograron temperaturas y humedades relativas adecuadas para la conservación de la pitaya sin gasto de energía porque no se utilizaron los equipos (ventilador y bomba sumergible) (ver Tabla 17).

En la etapa II o de hermeticidad se presentó un incremento de la temperatura interna como consecuencia del aumento de la temperatura externa, hasta llegar a la temperatura máxima de 35,9°C; en esta etapa, en la que se logró mantener una diferencia de temperatura promedio de 5°C durante las 6 horas, se evaluó la eficiencia de los materiales aislantes, ya que se buscó estabilizar las temperaturas bajas de la etapa I manteniendo el sistema completamente cerrado. Respecto de la humedad relativa, también se obtuvo una buena respuesta, pues la HR dentro del sistema se mantuvo 30% mayor a la externa. Sin embargo, entre las 12 y 16 horas se alcanzan las condiciones de temperatura y HR más negativas para la fruta, por lo cual fue necesario iniciar la humidificación del sistema, o fase III. En esta etapa se logró mantener estable la temperatura y humedad dentro del sistema, aunque con valores no muy adecuados para la conservación de la pitaya (53% HR y 27°C), pero si más favorables que las condiciones ambientales (25% HR y 32°C).

Durante la etapa IV de ventilación forzada en la que se retiró el calor almacenado producto de la respiración de la fruta y de las condiciones externas, se aprovecha el descenso de la temperatura externa y el incremento de la humedad externa, pues no hay humidificación mecánica. La temperatura se reduce y la humedad del sistema se incrementa hasta alcanzar 19°C y 83% HR, respectivamente.

Evaluación del comportamiento poscosecha de la fruta almacenada

La Figura 7 muestra el comportamiento de la pitaya durante el almacenamiento en términos de apariencia externa. La nomenclatura que se utilizó fue la siguiente: V: fruta verde, M: fruta madura, T: fruta testigo en estado de madurez verde, como se ilustra en la Tabla 18. Durante los dos primeros días de prueba, las frutas no presentaron diferencias significativas, pero a partir del día 8 se comenzaron a

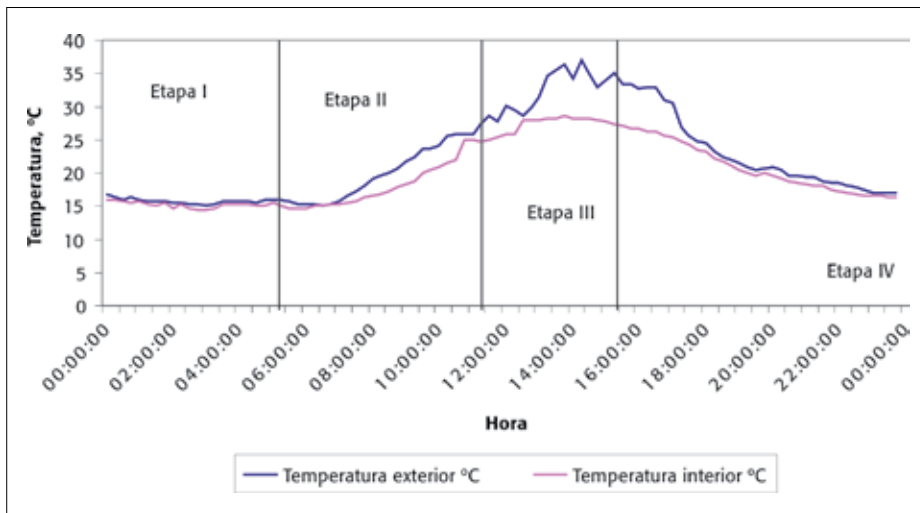


Figura 5. Comportamiento promedio de la temperatura ambiente y al interior de la cámara durante 24 horas.

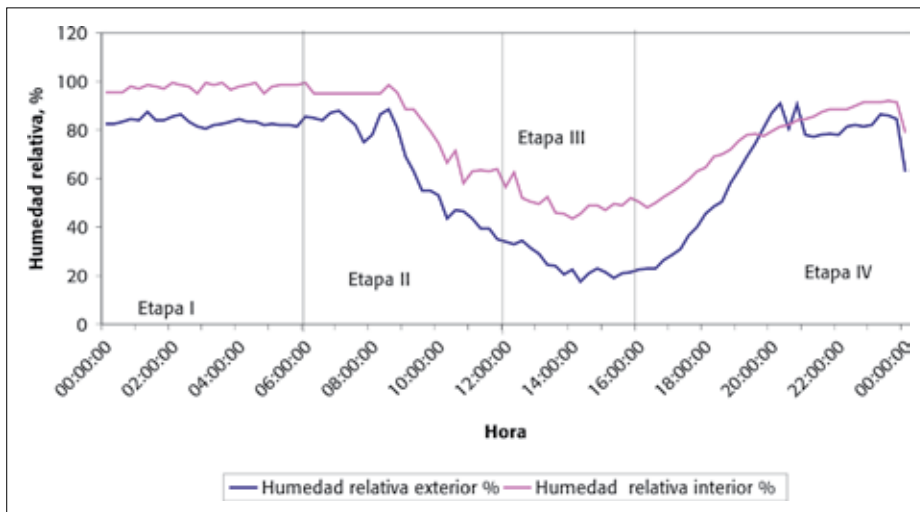


Figura 6. Comportamiento promedio de la humedad relativa del ambiente y al interior de la cámara durante los 19 días de evaluación.

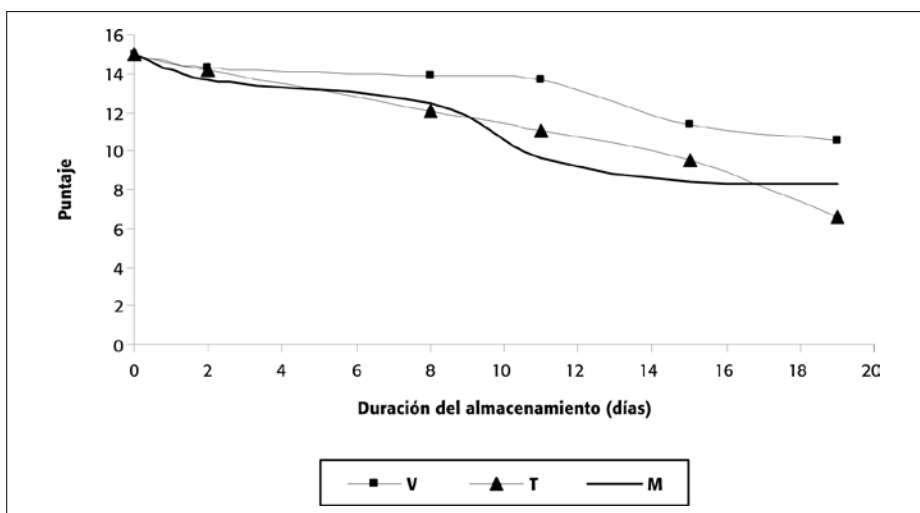


Figura 7. Evolución de la apariencia externa de la pitaya durante el almacenamiento.

observar diferencias importantes. Tanto la fruta almacenada madura, como la testigo se deterioraron rápidamente hasta el punto que al día 10 ya no eran aptas para su consumo. En el caso de la pitaya verde al cabo de los 19 días, aunque presentaba leve arrugamiento, no registró ningún otro tipo de daño.

La Figura 8 muestra la evolución del grado de madurez de la pitaya de acuerdo con el cambio de color. La velocidad de maduración de la pitaya verde almacenada presentó una evolución más lenta que la testigo. Sin embargo, el día 16 ya habían desarrollado plenamente su color y presentaban las características de una fruta madura. En el caso de la fruta testigo, al cabo de 8 días ya había alcanzado las características de color de una fruta en estado 5 de acuerdo con la tabla de color de la NTC 3554 (Icontec, 1996).

En la Figura 9 se observa que la principal ventaja alcanzada con el uso del sistema de almacenamiento es la disminución de la deshidratación. El porcentaje de deshidratación de la fruta almacenada se mantuvo por debajo del 10% durante los primeros 10 días y fue inferior al 15% a lo largo de los 19 días de evaluación. En la fruta testigo se superó el 15% de deshidratación al cabo de los 10 días y el 30% a los 19 días. Así, el sistema propuesto reduce la deshidratación en más del 40% y con ello, las pérdidas poscosecha de esta fruta.

El sistema de almacenamiento permaneció con una temperatura entre 15 y 23°C durante el 75% del día; el 25% del tiempo restante osciló entre 23 y 28°C. Estas temperaturas altas corresponden a temperaturas externas entre 31 y 36°C.

En términos generales la pitaya testigo se mantuvo hasta el día 10 en condiciones aceptables para su consumo, mientras que la fruta verde se mantuvo hasta el día 19. Esto puede considerarse como un resultado positivo, pues se reducen las pérdidas de fruta durante la poscosecha y se incrementa la vida útil entre 50% y 100%.

CONCLUSIONES

El hidrogenfriamiento presenta mayores ventajas para el pre-enfriamiento de la

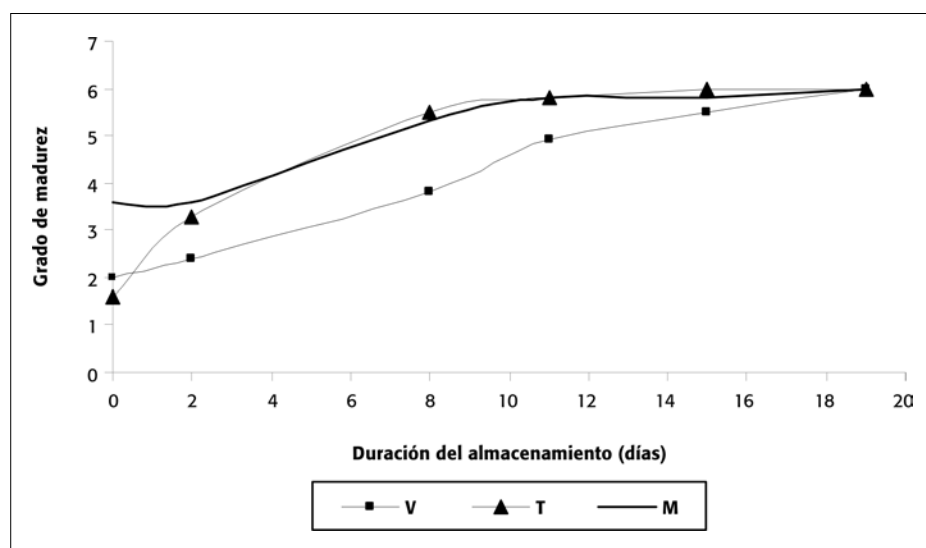


Figura 8. Evolución del grado de madurez de la pitaya almacenada.

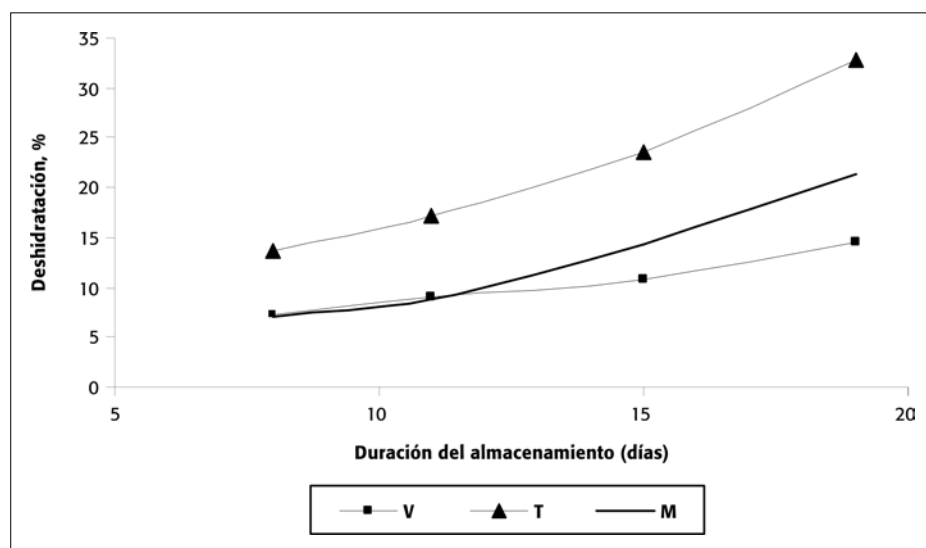


Figura 9. Pérdida de peso de la pitaya durante el almacenamiento.

pitaya, a causa de la velocidad de enfriamiento, la facilidad de implementación, su amplio uso en frutas y hortalizas y la posibilidad de combinarlo con las operaciones de limpieza y desinfección.

La canastilla plástica presenta alta resistencia a condiciones de temperatura y humedad relativa extremas, facilidad de manipulación, apilamiento y ventilación, es estructuralmente fuerte, ofrece protección del producto y su disponibilidad es amplia; por lo tanto, se recomienda como el empaque más apropiado para la pitaya en grandes volúmenes. En pequeños volúmenes para exportación se recomienda la caja de cartón.

La humidificación constituye un interesante sistema de almacenamiento para la pitaya, puesto que permite reducir la temperatura y humedecer el sistema de manera simultánea, retardando los procesos de senescencia de la fruta y evitando la deshidratación de la misma.

La cascarilla de arroz constituye una alternativa interesante como aislante, pues su conductividad es muy similar a la del poliuretano expandido, con una diferencia en el coeficiente de conductividad de 0,0059 W/m °C respecto del poliuretano, el aislante más utilizado comercialmente. Los resultados mostraron que una placa de cascarilla de arroz de 10 cm de espesor

permite disminuir la temperatura en 7°C en regiones templadas con temperaturas promedio de 24°C.

La principal ventaja del sistema propuesto radica en la reducción de pérdidas de fruta por deshidratación en el almacenamiento poscosecha. Además, el sistema se define como de bajo consumo energético teniendo en cuenta que el equipo puede permanecer apagado durante 14 horas por día.

La pitaya verde presentó un mejor comportamiento durante el almacenamiento en el sistema propuesto, por lo que se recomienda almacenar pitaya en este estado de madurez. El tiempo de conservación alcanzado de 19 días con la pitaya verde se considera positivo y contribuye a solucionar la problemática de pérdidas de esta cadena con una alternativa de fácil implementación a nivel de finca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Ing. Guillermo Zapata González, profesor de ingeniería química de la Universidad Fundación América, por su colaboración y orientaciones esenciales en el desarrollo del presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ASHRAE. Ashrae handbook fundamentals. Atlanta, 1997.
- Camargo, A. y O. Moya. 1995. Estudio preliminar de la influencia del choque térmico en la inhibición de daños por frío en la pitahaya amarilla. Trabajo de grado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
- Carrier Air Conditioning Company, 1983. Manual de aire acondicionado. McGraw-Hill, New York. pp. 1-94.
- Dossat, R. J. 1980. Principios de refrigeración. Editorial Continental, México. 240 p.
- Durán, S. 1983. Frigoconservación de la fruta. Perito Agrícola eds. Buenos Aires. 186 p.
- Forero, J. y J. Guerrero. 2003. Diseño y construcción a nivel piloto de un sistema de almacenamiento para pitaya. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Fundación América. 288 p.
- Holdsworth S.D. 1988. Conservación de frutas y hortalizas. Acirbia, Zaragoza (España). 360 p.

- Hollman, J. P. Transferencia de calor. 8ª ed. McGraw Hill, Madrid. 406 p.
- Incropera, F.P. 1999. Fundamentos de transferencia de calor. 4ª ed. Prentice Hall, México. 480 p.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas –ICONTEC–. 1994. Transporte y embalaje (NTC 1573). ICONTEC, Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas –ICONTEC–. 1998. Guía para el empaque de frutas y verduras (GTC 61). ICONTEC, Bogotá.
- Koelet, P.C. (ed.). 1997. Frío industrial: fundamentos, diseño y aplicaciones. Instituto del Frío, Madrid. 260 p.
- Kreith, F. 1993. Principios de transferencia de calor. Herrero Hermanos Sucesores S.A, México. 340 p.
- Leal, J.A. 1995. Refrigeración aplicada en la industria de alimentos. UNAD, Bogotá, 272 p.
- López, A. 1994. Las instalaciones frigoríficas en las industrias agroalimentarias (Manual de diseño). Madrid-Vicente eds. Madrid, (España). 320 p.
- Melgarejo, P. 1995. Aislamiento, cálculo y construcción de cámaras frigoríficas. Madrid Vicente eds., Madrid. 486 p.
- Mills, A. 1995. Transferencia de calor. Universidad de California & Irwin Co., Los Angeles (Cal, EUA).
- Orozco, C.A. 1996. Optimización del diseño de aislantes térmicos para cuartos fríos. Revista Scientia et Técnica No.3: 61-68.
- Pita, E. 1994. Acondicionamiento de aire: principios y sistema con un enfoque energético. Compañía Editorial Continental, México.
- . 1996. Principios y sistemas de refrigeración. Limusa, México.
- Pizzetti, C. 1982. Acondicionamiento del aire y refrigeración. Editorial Interciencia, Madrid. 424 p.
- Quiñones, B. 1982. Conservación de productos agrícolas y control de ambientes en construcciones pecuarias. Bogotá.
- Red Latinoamericana de Cascarilla. Coordinador Julio Ospina. Departamento de ingeniería agrícola. Universidad Nacional.
- Sánchez, M. y P. de Las Infantas. 2001. Ingeniería del frío: teoría y práctica. 1ª ed. AMV Ediciones MundiPrensa, Madrid. 378 p.
- Stoecker, W. F. 1982. Refrigeración y acondicionamiento de aire. McGraw-Hill, México. 480 p.
- Treybal, R.E. 1988. Operaciones de transferencia de masa. 2ª ed., McGraw-Hill, México.
- Vargas-Oviedo, W. (Sin año). Fundamentos de ciencia alimentaria. ICTA - Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- <http://www.developer.com/downloads/code/javascripts/script10299.html>
- <http://www.liberia.co.cr/promo/pitahaya.htm>